

基于HLA/pRTI1516和OPNET的航空战术数据链仿真系统

赵科莉¹, 寇明延¹, 李波², 徐亚军¹, 操振宇¹

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 将HLA分布式仿真技术与OPNET网络仿真平台相结合,设计了一种基于HLA/pRTI1516和OPNET的航空战术数据链分布式仿真系统;解决了OPNET不支持HLA底层支撑软件pRTI1516的问题,实现了OPNET的pRTI1516的通信接口,完成了外部仿真系统联邦成员与OPNET仿真平台的数据交互,以及外部仿真实体节点在OPNET中的建模和仿真分析。通过这个系统测试了Link16网络协议JTIDS的性能,验证了系统的可行性。

关键词: HLA; 航空战术数据链; pRTI1516; OPNET; 分布式仿真

中图分类号: V271.4; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0033-05

A Simulation System for Aero Tactical Data Link Based on HLA/pRTI1516 and OPNET

ZHAO Ke-li¹, KOU Ming-yan¹, LI Bo², XU Ya-jun¹, CAO Zhen-yu¹

(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: An aero tactical data link distributed simulation system was designed based on HLA/pRTI1516 and OPNET, by combining HLA distributed simulation technology with OPNET network simulation platform. The problem that OPNET doesn't support HLA underlying software pRTI1516 was solved, and OPNET's pRTI1516 communication interface was achieved. The data interaction between external simulation system and OPNET simulation platform was completed, and the modeling and simulation of the physical node of the external system in the OPNET was implemented. Finally, the performance of Link16 network protocol JTIDS was tested and the feasibility of the system was verified.

Key words: HLA; aero tactical data link; pRTI1516; OPNET; distributed simulation

0 引言

航空战术数据链的重要性正日益受到人们的关注,它已成为网络中心战的基础以及综合信息化军事系统的重要组成部分。统一平台多种应用、接口之间的连通性、建立标准化数字信息接口是航空战术数据链未来发展中需要解决的关键技术问题^[1-2]。

分布式仿真是研究统一平台多种应用的重要方法。高层体系架构^[3](High Level Architecture, HLA)是美国国防部于1996年提出的新一代分布式仿真技术框架^[4],它解决了分布式仿真的互操作性和重用性问题,满足了未来仿真发展的需求。美国MIL3公司的商业软

件OPNET是目前最流行的网络仿真平台,能够支持从简单的局域网到全球卫星网等各种通信系统的仿真^[5]。

本文设计并实现了分布式航空战术数据链仿真系统,该系统的设计目标是为了支持对航空战术数据链网络高实时性、强自组织性等多种动态特性的仿真模拟,对研究统一平台多种应用、接口之间连通技术等航空战术数据链网络的核心问题提供一个基础仿真平台。系统模拟多个仿真节点的动态行为,模拟仿真节点之间数据交换过程,模拟延时、丢包率、吞吐量和拓扑的动态变化,通过HLA/pRTI1516的联邦技术解决了大部分仿真节点之间的互联问题。

1 航空战术数据链分布式仿真系统概述

1.1 航空战术数据链

航空战术数据链系统主要由机载系统和地面系统组成,具有快速、机动、无线、多用户等特点。航空战术

数据链在美国等发达国家取得了很好的发展,是 C⁴ISR 系统沟通整个战场指控信息和情报交流的重要桥梁,与机载或地面的情报源、指挥控制等系统密切关联。为满足战场环境的需要,航空战术数据链需要具有连续的、高带宽语音、数据、作战控制指令和数字图像传输能力;能够实时应对网络拓扑的变化;具有较强的抗毁性。航空战术数据链系统的组成如图 1 所示。

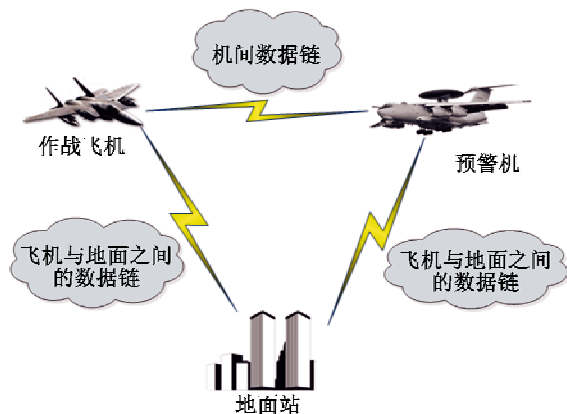


图 1 航空战术数据链系统基本组成框图

Fig.1 The basic composition of aero tactical data link system

1.2 分布式仿真技术和建模的基本方法

未来战场对数据通信的需求给航空战术数据链的设计带来了极大的挑战,仿真模拟是研究和设计数据链网络的重要手段,被学术界和工业界广泛采用。与在单一主机上运行的仿真相比,分布式仿真具有运行时间短、效率高、不存在单点故障、可靠性高、开发成本低、对计算机性能要求低等诸多优点,近年来逐渐成为仿真模拟技术的研究热点。

目前,HLA 是主要的分布式仿真体系结构。HLA 是在分布式交互仿真的经验基础上提出的一种全新的分布式仿真体系结构,以促进仿真的互操作性、可重用性、可伸缩性、实时性以及协同性。pRTI1516 实现了 C++ 绑定,既可提供 Java 的 API 函数,又可提供 C++ 的 API 函数,很好地解决了航空战术数据链分布式仿真系统中单个仿真实体之间的互联通信问题,使分布式仿真成为可能,解决了仿真子系统之间的实时性和有效性问题。

OPNET 几乎可以模拟任何网络设备、支持各种网络技术,除了能够模拟固定通信模型外,OPNET 的无线建模器还可用于建立分组无线网和卫星通信网的模型。因此,OPNET 可以很好地对仿真节点进行建模,分析每个仿真实体的丢包率、延迟以及误码率等性能特征参数。

通过设计 OPNET 的 pRTI1516 的接口,实现仿真子系统的互联和通信,从而实现航空战术数据链分布式仿真系统。

2 航空战术数据链分布式仿真系统架构

航空战术数据链分布式仿真系统需要仿真各个网络节点自身的状态变化和节点之间的信息交互,并且要求节点在仿真进行中可以动态地加入和退出仿真系统。为满足这些需求,需要给各个仿真节点提供一套高效、可配置的通信机制,因此,选择分布式仿真体系结构 HLA 作为仿真节点之间的通信协议,通过 HLA 提供的底层支撑软件 RTI 实现仿真节点间的信息传输。pRTI1516 是支持 IEEE 1516 标准的一套 RTI 实现,不仅有功能强大的图形用户界面、提供了仿真应用运行的直观监控手段,而且包括日志工具,通过它可以检查联邦成员与底层软件 pRTI1516 之间的通信,进行仿真应用的调试,加快仿真应用的开发工作^[6]。因此,本系统选择 pRTI1516 实现联邦成员间的通信。OPNET Modeler 是一种图形化的网络仿真工具,具有通用的高级建模语言和丰富的模型库,可以高效地对网络节点的内部行为进行建模,因此,本系统选择 OPNET Modeler 作为仿真节点的建模工具。

系统的总体设计框图如图 2 所示。

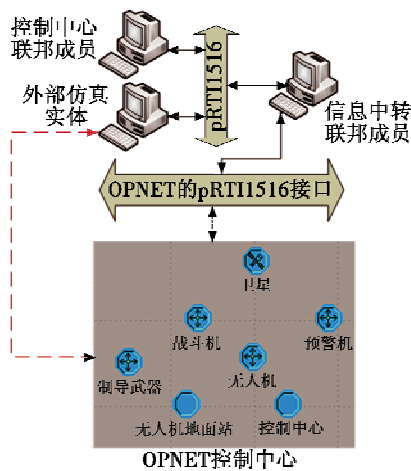


图 2 系统总体设计框图

Fig.2 The overall design composition of the system

系统主要由 4 个模块组成:外部仿真实体模块模拟外部仿真实体;控制中心模块模拟控制中心联邦成员,用于控制外部仿真实体模块和信息中转模块之间信息传输的路径和方向,以及控制仿真过程中时间的同步和事件的推进;信息中转模块通过联邦订购外部仿真实体发布的信息参数并发送给 OPNET 仿真平台,同时把 OPNET 仿真性能参数发布到联邦中,通过控制中心模块的控制实现对外部仿真实体性能参数的修正;OPNET 接口模块,通过其接口的设计实现外部仿真实体与 OPNET 仿真平台的通信。在该仿真系统设计中,OPNET 接口模块是实现分布式信息交互的核心

部分。

3 接口的设计

3.1 OPNET 的 ESYS 接口的设计

OPNET 与其他仿真平台通信有 3 个接口:1) EMA 接口,主要以 XML 文件的形式实现 OPNET 网络拓扑图的导入和导出;2) HLA 接口,支持 OPNET 与外部仿真实体之间进行数据交互,但是这个接口不支持 pRTI1516;3) ESYS 接口,在联合仿真中 OPNET 与其仿真器进行数据交换的机制^[7]。综上考虑,只能选择 ESYS 接口实现 OPNET 与基于 pRTI1516 信息中转联邦成员的通信。

3.2 OPNET 的 pRTI1516 的接口设计

OPNET 与外部系统的协同仿真涉及接口模块和接口函数模块。接口模块包括 ESYS 模块、ESD(External System Definition) 模型和 ESD/ESYS 接口。ESYS 模块位于 OPNET 节点模型中,ESD 模型由 SD 文件和 ESD/ESYS 接口组成,SD 文件供 OPNET 与外部程序编译和链接时使用,而 ESD/ESYS 接口则定义了 OPNET 内部与外部仿真通信接口。接口函数包括 op_esys 核心函数,ESYS 接口中断和 ESA(External Simulation Access) API 函数。op_esys 核心函数供 OPNET 内部对接

口值的读写,ESYS 接口中断是在 ESYS 接口有数据输入时自动触发中断类型,ESA API 函数则是供外部系统使用,以配合 OPNET 内核推进仿真进行的 API 函数,主要包括仿真初始化、时间推进、仿真终止、读写仿真时间以及实现接口数据交换等功能^[8-10]。

通过 OPNET 的 ESYS 接口,使用 C++ 的动态链接库和 SOCKET 通信辅助完成 OPNET 与信息中转联邦成员的通信,间接实现了 OPNET 和基于 HLA/pRTI1516 的联邦成员的通信接口。图 3 所示为 OPNET 的 pRTI1516 接口设计框图。

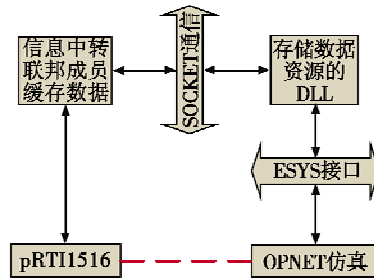


图 3 OPNET 的 pRTI1516 接口设计框图
Fig. 3 The design diagram of the OPNET's pRTI1516 interface

图 4 所示为接口设计逻辑流程。

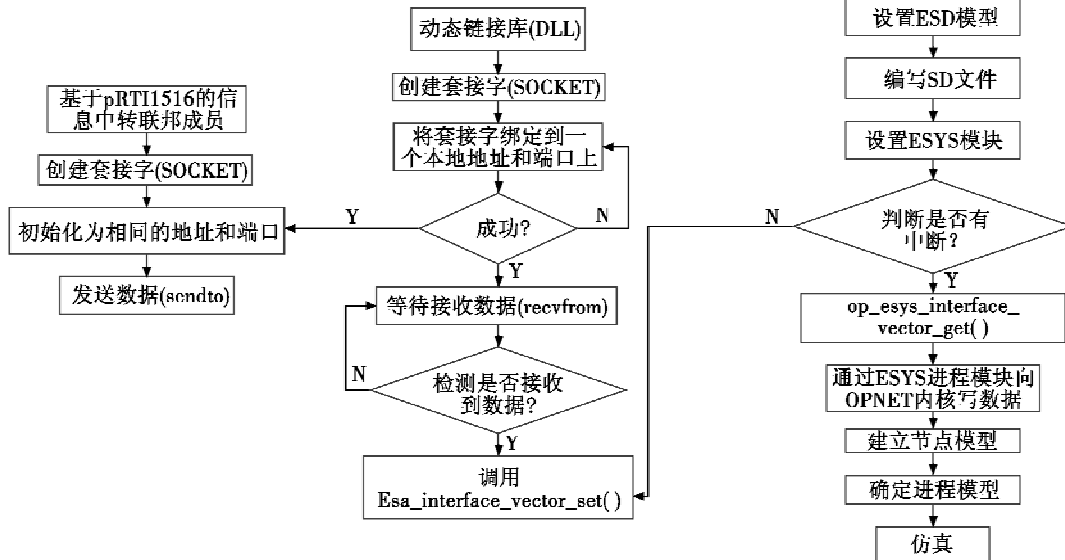


图 4 接口设计逻辑流程图

Fig. 4 The logic flow chart of the interface design

图 4 中,信息中转联邦成员通过 pRTI1516 底层支撑作用实时接收并保存了外部仿真实体的仿真节点参数属性,并通过套接字技术实现与动态链接库之间的信息传输。当动态链接库接收到数据后,就调用 ESA API 函数,利用 OPNET 仿真平台的 ESYS 接口进行通信。OPNET 仿真平台在仿真初始化时,完成 ESD

模型、SD 文件以及 ESYS 接口模块的设置。ESYS 接口有数据写入时自动触发中断,通过判断是否有中断来确定是否调用核心函数保存数据,成功保存数据后,就可利用 OPNET 进行节点和进程模型的建模和仿真。通过这个接口的设计不仅解决了 OPNET 没有实现 pRTI1516 接口的问题,而且实现了外部仿真实体在

OPNET 平台中的仿真建模。

4 航空战术数据链分布式仿真系统的仿真验证

4.1 仿真概述

本节给出一个利用该分布式仿真系统进行分布式仿真的实例,该实例通过仿真手段研究 Link16 战术数据链协议(Joint Tactical Information Data System, JTIDS)的性能。

Link16 数据链是工作在 960 ~ 1206 MHz 频段工作的一种保密、抗干扰、低截获概率的通信链路。根据 Link16 网络的技术体制和技术特点采用三层结构对其进行仿真建模。用两个仿真模块实现这三层结构:物理层的模拟由物理信道模拟软件实现,该软件作为图 2 描述的系统结构中的外部仿真实体完成对真实物理环境的模拟,模拟真实的物理信道模型,实时反映外界大气、干扰等物理因素的变化对信道模型的干扰;MAC 层和应用层由 OPNET 模型实现,对应图 2 中的 OPNET 控制中心。通过 OPNET 的 pRTTI1516 接口进行物理层模型和 OPNET 中的 MAC 层以及应用层之间的链接、实现两个仿真模块的交互,从而实现分布式仿真功能。

4.2 物理层模型

OPNET 里提供的管道模型^[11]用来实现物理层的功能。但是 JTIDS 链路技术体制复杂,综合采用直接扩频、跳频、跳时、RS 纠错检错编码、MSK 等技术,不能使用 OPNET 自带的简单的管道模型来进行仿真。为提高仿真精度,自行开发了一套专用的物理信道模拟软件,通过设计的 pRTTI1516 接口,将 OPNET 和物理信道模拟软件组成分布式仿真系统。

4.3 MAC 层和应用层模型

用 OPNET 进行 Link16 的 MAC 层和应用层协议的建模,OPNET 仿真模型分为节点模型和进程模型。

4.3.1 节点建模

图 5 所示为端机节点模型。

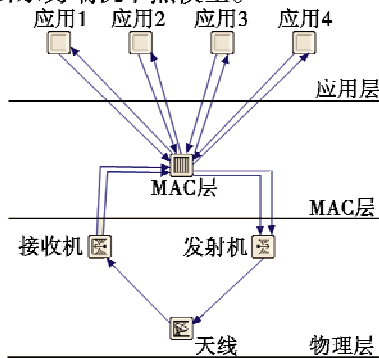


图 5 终端节点模型

Fig.5 Terminal node model

该模型用来模拟 Link16 端机性能,其主要功能是完成端机初始化、模拟产生信息源、发送数据包给 MAC 层、控制节点的收发时隙等,端机节点中核心部分是 MAC 进程。

4.3.2 进程模型

端机节点的 MAC 进程负责发送广播消息、统计丢包率、端到端时延等网络性能。MAC 进程结构见图 6。

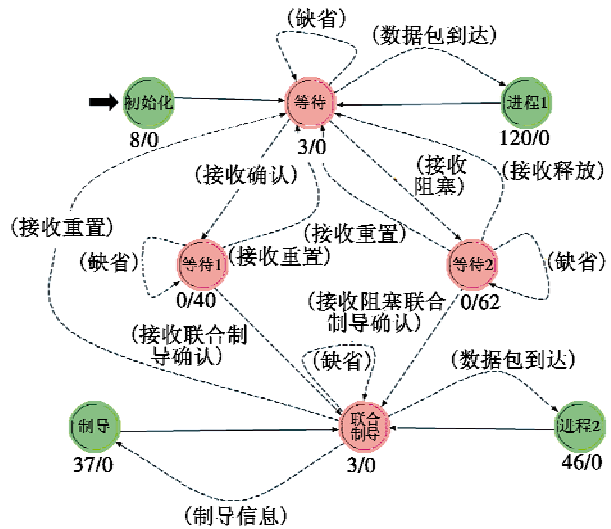


图 6 MAC 的进程模型

Fig.6 Process model of MAC

4.4 仿真场景

仿真中一共配置了 50 个端机节点,分布在 3 个子网中,使用 2 个中继节点处理子网之间的消息转发。中继节点高度设置为 3000 m,50 个端机节点的高度为 100 ~ 2000 m 内的随机值,通过物理层仿真软件实时生成各个节点的运动轨迹和信道数据。仿真分别在白噪声、定频干扰和 10 个频点阻塞干扰的条件下运行,模拟 Link16 链路在不同电磁环境下的网络性能。

4.5 仿真结果

为了衡量 JTIDS 协议的性能,需要定性和定量的评估指标来度量。参考目前对 JTIDS 协议的仿真测试,为了使其更具有普遍意义,本文选择对丢包率和吞吐量两个指标进行分析说明。

图 7 给出了在受到不同干扰时,端节点的丢包率曲线。

可以看到,由于无线信道环境和节点移动性的限制,在白噪声条件下,端节点有大约 25% 的丢包率;在加入定频干扰时,丢包率有小幅上升,但变化幅度并不明显;当干扰换为 10 频点阻塞干扰时,丢包率大幅度上升,超过 60%。

图 8 给出了在受到不同干扰时,整个网络的吞吐量曲线。

可以看到,和端节点的丢包率情况类似,单频干扰

对系统吞吐量的影响不大,但当实施多频点阻塞干扰时,网络的吞吐量大幅下降。

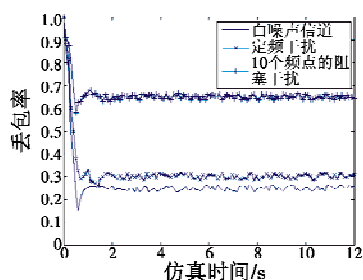


图7 节点的丢包率

Fig.7 Packet loss ratio of node

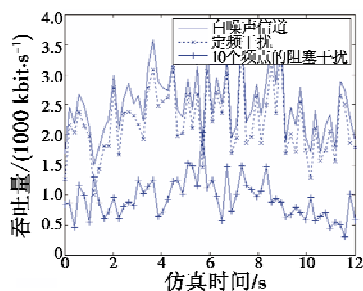


图8 不同干扰下的网络吞吐量

Fig.8 Net throughput under different interference conditions

5 结论

本文设计和实现了航空战术数据链分布式仿真系统,运用联邦技术和进程间通信的 SOCKET 方法间接实现了 OPNET 的 pRTI1516 接口,并利用该系统对 Link16 网络协议 JTIDS 的性能进行了测试。通过分布式联合仿真,可以较准确地模拟复杂的电磁环境和干扰条件对 Link16 网络的影响,得到定性和定量的分析结果,对网络协议的设计和性能改进具有指导性意义。

参考文献

[1] 廖长清,龚诚. 航空战术数据链系统及关键技术的探讨[J]. 航空电子技术,2005,36(1):11-15.
LIAO C Q, GONG C. An investigation on aero tactical data link systems and their key technologies [J]. Avionics Technology, 2005, 36(1):11-15.

[2] 王文政,周经伦,罗鹏程. 战术数据链技术发展研究[J]. 电光与控制,2008,15(11):41-46.
WANG W Z, ZHOU J L, LUO P C. Review of tactical data link technology [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(11):41-46.

[3] 周彦,戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
ZHOU Y, DAI J W. HLA simulation program design[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2002.

[4] 朱恒晔,李光耀. 基于 HLA 的分布式仿真负载平衡研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(13):2964-2967,3072.
ZHU H H, LI G Y. Research on load balancing in HLA-based distributed simulation[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(13):2964-2967, 3072.

[5] 丁丁,王杉,魏急波,等. 基于 HLA 的 OPNET 仿真联邦成员设计与实现[J]. 系统仿真学报,2007,19(7):1601-1603,1645.
DING D, WANG S, WEI J B, et al. Research and implementation on OPNET simulation federate based on HLA [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7):1601-1603, 1645.

[6] IEEE 1516-2009. Standard for modeling and simulation (M&S)-High Level Architecture (HLA)-framework and rules IEEE Computer Societh[S]. New York:IEEE, 2009.

[7] 陈寅,宋杨,费敏锐. 基于 Simulink 和 OPNET 的交互式联合仿真研究[J]. 系统仿真学报,2011,7(3):242-247.
CHEN Y, SONG Y, FEI M R. Interactive cosimulation based on simulink and OPNET [J]. System Simulation Technology, 2011, 7(3):242-247.

[8] OPNET Technologies. Using modeler's co-simulation capabilities to integrate with external systems[Z]. Washington D. C.:OPNET Technologies, 2008.

[9] FUJITA K. Extending OPNET modeler with client profiles for selecting data sources in WAN [R]. Nebula Project: Final Report Apr-16-2003;1-19.

[10] AUGERI C J, MORRIS K M, MULLINS B E. JOCosim: Using Java, OPNET, and C to enable mobile co-simulation[C]//The 10th OPNETWORK Conference, OPNET Technologies, 2006:1-8.

[11] 李馨,叶明. OPNET Modeler 网络建模与仿真[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006:257-303.
LI X, YE M. OPNET modeler network modeling and simulation[M]. Xi'an:University of Electronic Science and Technology Press, 2006:257-303.